

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 551.521

Полуэмпирические статистические модели влияния атмосферного аэрозоля на возмущения потоков коротковолновой солнечной радиации по данным фотометрических измерений

А.П. Лужецкая¹, В.А. Поддубный¹, Т.В. Ципуштанова^{2*}

¹Институт промышленной экологии УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Поступила в редакцию 25.11.2014 г.

С использованием результатов долговременных измерений за 2004–2014 гг. в пункте мониторинга системы AERONET, расположенном на Среднем Урале, выполнен статистический анализ связей прямого аэрозольного радиационного форсинга (АРФ) на верхней границе атмосферы, аэрозольного радиационного возмущения (АРВ) на нижней границе атмосферы в спектральном диапазоне 0,2–4 мкм с оптическими и микрофизическими характеристиками атмосферного аэрозоля. Предложено применять многофакторный регрессионный анализ для построения простых моделей «АРФ, АРВ – параметры аэрозоля». Найдены ранжированные наборы параметров аэрозоля, являющиеся статистически независимыми наиболее значимыми предикторами. Представлены несколько полуэмпирических статистических линейных и нелинейных моделей влияния атмосферного аэрозоля на возмущения потоков коротковолновой солнечной радиации.

Ключевые слова: аэрозоль, форсинг, возмущение потоков радиации, эмпирические статистические модели, регрессионный анализ, AERONET; aerosol, forcing, perturbation of the flow of radiation, empirical statistical models, regression analysis, AERONET.

Введение

Аэрозоль играет важную роль в энергетическом балансе атмосферы, рассеивая и поглощая приходящее солнечное и исходящее земное излучение, а также изменяя микрофизические и радиационные свойства облаков. Для количественной оценки прямого воздействия аэрозоля на радиационный бюджет атмосферы широко используется величина, называемая аэрозольным радиационным форсингом (АРФ) [1]. Обычно прямой радиационный форсинг атмосферных аэрозолей $\Delta\Phi$ определяется как изменение в балансе радиационных потоков F атмосферы следующего вида:

$$\Delta\Phi = (F^{\downarrow a} - F^{\uparrow a}) - (F^{\downarrow 0} - F^{\uparrow 0}), \quad (1)$$

где стрелки обозначают направление потоков нисходящей (\downarrow) и восходящей (\uparrow) радиации; индекс « a » соответствует потокам радиации, рассчитанным (или измеренным) в присутствии аэрозоля в атмосфере; индекс «0» – потокам радиации в условиях «базовой» атмосферы. В качестве базовых условий отсчета форсинга обычно используют атмосферу

доиндустриальной эпохи либо «фоновую» атмосферу без антропогенного аэрозоля, либо атмосферу с полным отсутствием аэрозоля.

В зависимости от приближений, применяемых в климатических моделях, существует множество уточняющих вариаций общего определения радиационного форсинга. В любом случае для оценки АРФ используют данные измерений потоков радиации и свойств атмосферного аэрозоля, а также результаты численного моделирования процессов переноса солнечного и земного излучения в атмосфере. Примерами моделей, позволяющих рассчитать перенос излучения в атмосфере, являются COART [2] и MOSART [3]. В работах [4, 5] представлена модель переноса излучения в различных атмосферных условиях, разработанная российскими авторами.

В ряде случаев радиационный форсинг парниковых газов и аэрозолей представляют в виде простых функций от определяющих параметров. Для парниковых газов в качестве определяющего параметра используют концентрации примеси в атмосфере [6], а для аэрозолей на локальном или региональном масштабах – аэрозольную оптическую толщину (АОТ) [7, 8], являющуюся мерой общего содержания аэрозольных частиц в атмосфере. В глобальном масштабе из-за пространственной и временной из-

* Анна Павловна Лужецкая (ann@ecko.uran.ru); Василий Алексеевич Поддубный (basil@ecko.uran.ru); Татьяна Владимировна Ципуштанова (tatka93_15@mail.ru).

менчивости свойств аэрозоля (включая АОТ) такая параметризация невозможна.

В большинстве случаев в простых формулах параметризации используются однофакторные линейные или нелинейные зависимости АРФ от величины АОТ [9, 10]. Следствием этого может стать существенная погрешность в расчетах радиационных эффектов аэрозоля.

Целью настоящего исследования является определение степени статистической связи потоков коротковолновой солнечной радиации и различных характеристик атмосферного аэрозоля, измеряемых и/или восстанавливаемых по данным сетевых измерений, а также разработка простых многофакторных линейных и нелинейных полуэмпирических моделей, учитывающих статистически наиболее значимые характеристики аэрозоля для Среднего Урала.

Исходные данные и корреляционный анализ

На сегодняшний день самой информативной наземной системой мониторинга свойств атмосферного аэрозоля является сеть AERONET, включающая более 400 спектральных солнечных фотометров (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>), распределенных по всему миру. В рамках этой сети мониторинга на основе единой приборной базы и единой системы калибровки, по единым алгоритмам обработки результатов измерений восстанавливается более десятка наиболее важных характеристик атмосферного аэрозоля [11, 12]. Обзор и результаты исследований российского сегмента сети AERONET представлены в [13]. Массив результатов текущих измерений и архив данных мониторинга за предшествующие годы находятся в открытом доступе, обеспечивая наилучший, наиболее полный источник исходной информации для решения поставленной задачи.

В качестве входных данных для статистического анализа и построения полуэмпирических моделей в настоящем исследовании используются результаты измерений, полученные в пункте мониторинга AERONET на Среднем Урале. Согласно классификации [14], этот пункт мониторинга можно рассматривать в качестве станции измерений свойств фонового континентального аэрозоля. Для анализа статистических связей между потоками коротковолновой радиации и параметрами аэрозоля были выбраны следующие основные характеристики, восстанавливаемые по данным спектральных измерений прямого и рассеянного солнечного излучения: аэрозольная оптическая толщина τ_λ , где λ — длина волны; влагосодержание в столбе атмосферы W , $\text{см}^3/\text{см}^2$; функция распределения объемов аэрозольных частиц по размерам; параметр α формулы Ангстрема $\tau_\lambda = \beta\lambda^{-\alpha}$; комплексный показатель преломления $m_\lambda = n_\lambda + ik_\lambda$; аэрозольная индикатриса однократного рассеяния $f_s(\theta)$, где θ — угол рассеяния излучения; фактор асимметрии индикатрисы аэрозольного рассеяния g_λ ; альbedo однократного рас-

сеяния аэрозоля ω_λ и др. Также рассматривалась статистическая зависимость потоков коротковолновой радиации от зенитного угла Солнца θ_0 .

В наших исследованиях использовались результаты измерений, прошедшие окончательный контроль качества, т.е. данные уровня 2.0 (по классификации AERONET, см. [13]), полученные за период измерений с 2004 по 2014 г. Полное количество элементов в таких выборках АОТ составило 702 (2179 для уровня 1.5). В связи с тем что при решении обратных задач восстановление альbedo однократного рассеяния и комплексного показателя преломления надежно осуществляется лишь для высоких значений АОТ ($\tau_{0,44} > 0,4$), дополнительная фильтрация исходных данных приводит к сокращению итоговых выборок до 95 элементов.

Основные закономерности и характерные значения АОТ, параметра Ангстрема, функции распределения частиц по размерам, полученные по данным многолетних спектральных измерений на Среднем Урале, представлены в [15]. Описание других параметров аэрозоля, включая их изменчивость и спектральные зависимости, достаточно подробно изложено в [13]. Помимо перечисленных выше характеристик аэрозоля в статистическом анализе использовались также значения альbedo подстилающей поверхности A_λ , полученные на основе результатов измерений спутникового сканера MODIS [16], поскольку эта величина существенно влияет на процессы переноса излучения в климатической системе.

В перечень исходных данных входят также оценки спектральных и широкополосных потоков солнечной радиации, прямого аэрозольного радиационного форсинга в коротковолновом диапазоне солнечного излучения (0,2–4 мкм) на верхней и нижней границах атмосферы, рассчитываемые и публикуемые в системе AERONET. Во избежание недоразумений следует отметить, что далее мы используем определение аэрозольного радиационного возмущения (АРВ) потоков солнечного излучения, которое в системе AERONET называется аэрозольным форсингом. В отличие от определения, задаваемого формулой (1), АРВ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta F_v = (F_v^{\uparrow 0} - F_v^{\uparrow a}), \quad (2)$$

$$\Delta F_n = (F_n^{\downarrow a} - F_n^{\downarrow 0}), \quad (3)$$

где индексом «v» обозначен верхний, а индексом «n» — нижний уровень атмосферы, а в качестве начала отсчета АРВ используется модельная атмосфера с полным отсутствием аэрозоля.

Рассчитанная таким образом величина по своему физическому смыслу представляет собой не изменение радиационного баланса, как в определении АРФ, а аэрозольное возмущение (или искажение) потоков нисходящей (3) или восходящей радиации (2), обусловленное присутствием в атмосфере частиц аэрозоля. Очевидно, что на верхней границе атмосферы формулы (1) и (2) дают идентичный

результат. На нижней границе атмосферы физическое содержание и результаты расчетов по формулам (1) и (3) различны.

По данным AERONET уровня 2.0, для Среднего Урала на нижней границе атмосферы аэрозольное возмущение потоков солнечной радиации всегда отрицательно и меняется в диапазоне от -38 до -178 Вт/м², при медианном значении $-87,6$ Вт/м². На верхней границе атмосферы АРВ равно АРФ и может принимать как отрицательные, так и положительные значения в диапазоне от $+18$ до -106 Вт/м², при медианном значении $-48,2$ Вт/м². Отметим, что положительные значения АРФ свидетельствуют о нагреве атмосферы, а отрицательные – о ее выхолаживании.

При разработке статистических моделей АРФ на верхней и АРВ на нижней границах атмосферы в качестве аргументов таких моделей должны присутствовать статистически независимые предикторы. Наличие функциональной зависимости (например, АОТ от длины волны излучения) означает сильную корреляцию между значениями функции при разных значениях ее аргумента. Поэтому вместо всего возможного набора значений функций в качестве предикторов статистических моделей следует выбрать либо значения функций лишь при одном значении аргумента, либо интеграл от функции по всему диапазону возможных изменений аргумента.

При переборе спектральных значений функций τ_λ , ω_λ , g_λ , $f_\lambda(\theta)$, n_λ , k_λ , A_λ были оценены частные (парные) коэффициенты корреляции и обнаружено, что в большинстве случаев влияние этих параметров на величину АРФ и АРВ наиболее значительно (модуль коэффициента корреляции максимален) на длине волны $0,675$ мкм. Поэтому в дальнейшем анализе используются значения этих функций на длине волны $0,675$ мкм – значения этих функций на других длинах волн статистически зависимы от значений функций на выбранной длине волны. С целью возможности сравнения с другими работами для величины АОТ сделано исключение и используется либо $\tau_{0,675}$, либо $\tau_{0,5}$.

Аналогичным образом для последующего анализа из множества возможных значений углов индикатрисы рассеяния аэрозоля $f_{0,675}$ был выбран угол $46,4^\circ$. Кроме того, вместо функции распределения объемов частиц по размерам использовались интегралы от нее: объемная концентрация тонкодисперсной C_{V_f} и грубодисперсной C_{V_c} фракций аэрозоля, а также их отношение $\varepsilon = C_{V_f}/C_{V_c}$.

Расчет коэффициентов парных корреляций между параметрами аэрозоля, АРФ и АРВ позволил найти и отбросить статистически незначимые параметры аэрозоля и ранжировать все значимые параметры по степени их статистической связи. Последующий расчет коэффициентов парных корреляций между анализируемыми параметрами аэрозоля позволил найти те характеристики аэрозоля, которые имеют существенную (модуль коэффициентов корреляции превышает $0,5$) статистическую связь и не могут рассматриваться как независимые.

После исключения зависимых переменных были получены следующие списки возможных предикторов для эмпирических статистических моделей АРФ и АРВ. На верхней границе атмосферы: $\tau_{0,675}$ ($-0,87$), $\omega_{0,675}$ ($-0,65$), $A_{0,675}$ ($0,54$), $n_{0,675}$ ($-0,50$), W ($-0,36$), где в скобках указаны значения парных коэффициентов корреляции. На нижней границе: $\tau_{0,675}$ ($-0,93$), $n_{0,675}$ ($-0,34$), $f_{0,675}$ ($-0,26$), $g_{0,675}$ ($-0,24$), θ_0 ($0,20$), $\omega_{0,675}$ ($-0,19$).

На первый взгляд кажется странным, что в списке возможных предикторов АРВ на нижней границе атмосферы отсутствует альbedo поверхности. Такой результат – не ошибка анализа, а следствие использования специфического определения АРВ на нижней границе атмосферы, применяемого в системе AERONET [см. формулу (3)] и учитывающего только потоки нисходящей радиации.

Линейные регрессионные модели

Простейшей статистической моделью для АРФ на верхней границе атмосферы и АРВ на нижней является уравнение линейной регрессии, в котором единственным предиктором служит величина АОТ на длине волны $0,5$ мкм, а влияние всех остальных оптических и микрофизических параметров аэрозоля учитывается с помощью аддитивной константы. Такой подход вполне допустим, так как АРФ и АРВ наиболее сильно коррелируют именно с АОТ. На множестве исходных данных за 2004–2014 гг. методом наименьших квадратов были найдены значения коэффициентов этих линейных зависимостей, которые оказались статистически значимыми на уровне значимости $0,05$. В результате были найдены следующие соотношения, которые могут рассматриваться как статистические полуэмпирические модели:

$$\Delta F_v = -47,8\tau_{0,5} - 6,3, R^2 = 0,74, \quad (4)$$

$$\Delta F_n = -71,8\tau_{0,5} - 30,3, R^2 = 0,88, \quad (5)$$

имеющие довольно высокое качество аппроксимации – высокие значения коэффициентов детерминации R^2 . Отрицательные значения коэффициентов наклона означают то, что с ростом АОТ усиливается выхолаживание системы – АРФ и АРВ имеют отрицательные значения и уменьшаются.

На рис. 1 показаны исходные значения АРФ на верхней и АРВ на нижней границах атмосферы, а также найденные линейные зависимости ΔF_v и ΔF_n как функции от АОТ на длине волны $0,5$ мкм. Как видно из рисунка, линейная регрессия довольно хорошо описывает множество значений АРФ и АРВ (при высоких значениях АОТ) как на верхней, так и на нижней границах атмосферы. Наибольшие расхождения соответствуют ситуациям, наблюдаемым в апреле 2007 г., с высокими значениями альbedo поверхности (наличие снега). По-видимому, статистические полуэмпирические модели для зимних и летних условий должны существенно различаться.

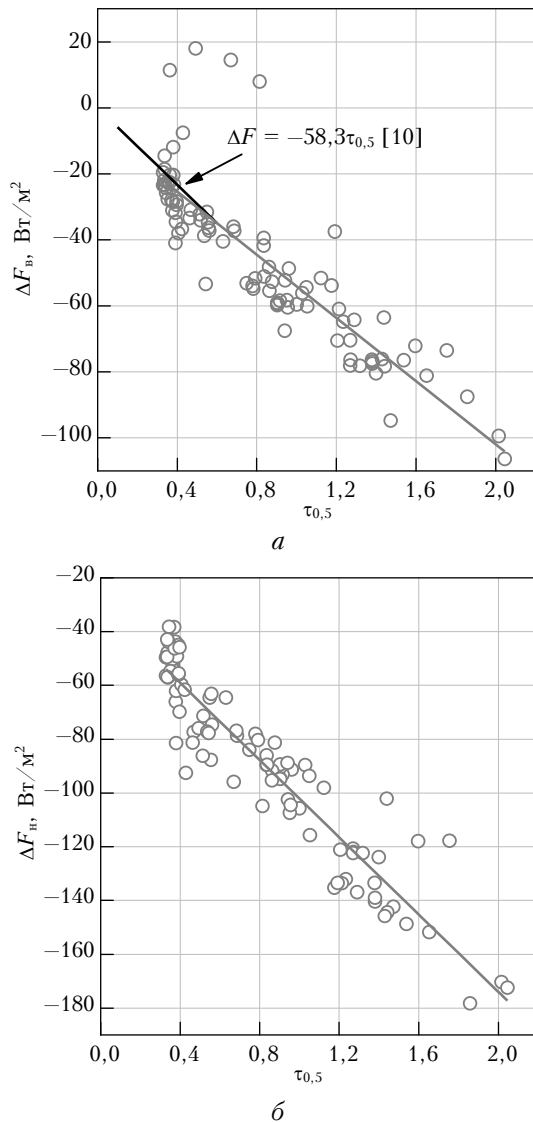


Рис. 1. Однофакторные линейные регрессионные модели: *a* – для АРФ на верхней границе атмосферы, уравнение (4) и из [10]; *б* – для АРВ на нижней границе атмосферы, уравнение (5)

Качество модели можно повысить путем учета других характеристик аэрозоля, т.е. включить в уравнение модели дополнительные предикторы. Для этого рассматривались списки возможных независимых предикторов, полученные с помощью корреляционного анализа. Однако анализ парных коэффициентов корреляции недостаточен, так как присутствие в уравнении нескольких независимых переменных может изменить значимость каждого отдельного предиктора. Поэтому для построения многофакторной модели применялась пошаговая процедура присоединения-удаления переменных, которая состоит в следующем. Прежде всего выбиралась переменная наиболее сильно коррелированная с АРФ и АРВ, и находилось соответствующее линейное регрессионное уравнение первого порядка. Далее в уравнение добавлялась вторая переменная, и определялись частные коэффициенты корреляции для всех переменных.

Полученное второе регрессионное уравнение проверялось на статистическую значимость, и отмечалась степень изменения коэффициентов корреляции и детерминации. Соответствующая переменная сохранялась в уравнении или исключалась из него в зависимости от результатов проверки.

Такая проверка целесообразности использования переменных в параметрической формуле проводилась на каждом этапе присоединения нового предиктора к уравнению. Параметрическое соотношение считалось сформированным, когда вновь включаемые переменные не приводили к значимому улучшению качества модели – увеличению R^2 . Методом наименьших квадратов определялись коэффициенты полученного регрессионного уравнения, и рассчитывался множественный коэффициент корреляции модели.

В результате на проанализированном множестве исходных данных получены следующие статистические полуэмпирические линейные многофакторные модели АРФ и АРВ:

$$\Delta F_{\text{в}} = -58,4\tau_{0,675} - 158,6\omega_{0,675} + 107,5A_{0,675} + 129, \quad (6)$$

$$R^2 = 0,95,$$

$$\Delta F_{\text{н}} = -115,2\tau_{0,675} + 230,1\omega_{0,675} + 0,7\theta_0 - 288,8, \quad (7)$$

$$R^2 = 0,93,$$

где θ_0 – зенитный угол Солнца, град.

Полученные уравнения содержат только статистически значимые независимые предикторы. Следует отметить, что данные, использованные для построения моделей (6), (7), в основном соответствуют летнему периоду измерений с диапазоном изменений зенитного угла Солнца 50–75°. В модели для верхней границы атмосферы обнаружено слабое, статистически незначимое влияние параметра θ_0 на значение АРФ, что согласуется с [17].

Таким образом, выполненный статистический анализ показывает, что АРФ на верхней границе атмосферы определяется аэрозольной оптической толщиной, альbedo однократного рассеяния, альbedo поверхности, а величина АРВ на нижней границе атмосферы зависит от аэрозольной оптической толщи, альbedo однократного рассеяния аэрозольных частиц и зенитного угла Солнца.

Как и ожидалось, коэффициенты корреляции и детерминации увеличились по сравнению с простой (однофакторной) регрессионной моделью [см. формулы (4), (5)] и составили для АРФ – 0,95, для АРВ – 0,93, вместо 0,74 и 0,88 соответственно. Рис. 2 демонстрирует результаты сравнения исходных данных АРФ и АРВ по AERONET и соответствующих величин, рассчитанных по многофакторной статистической модели (6)–(7).

Закон распределения абсолютных ошибок многофакторных регрессионных моделей статистически значимо не отличается от нормального закона распределения (тест Хи-квадрат) как для верхней, так и для нижней границ атмосферы. Средняя величина

абсолютных ошибок составляет на верхней границе $4,3 \text{ Вт/м}^2$ (менее 9% от медианного значения АРФ), на нижней границе $6,6 \text{ Вт/м}^2$ (8% от медианы АРВ). Средние относительные ошибки составляют для модели ΔF_v 11% и для модели ΔF_n 8%.

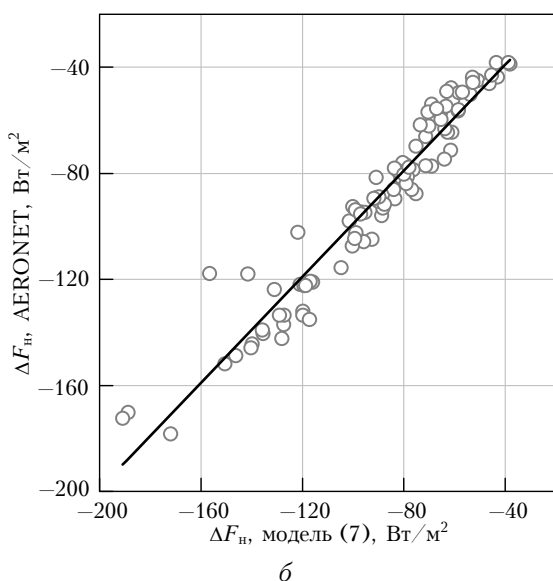
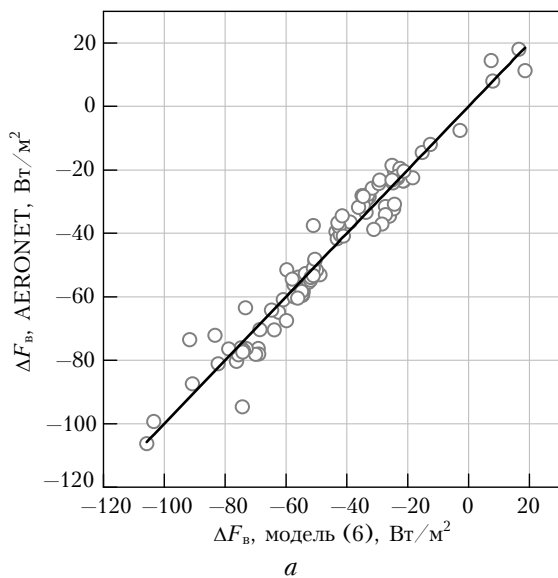


Рис. 2. Диаграммы рассеяния, рассчитанные по данным AERONET и моделям множественной линейной регрессии: *a* – для АРФ на верхней границе атмосферы, уравнение (6); *б* – для АРВ на нижней границе атмосферы, уравнение (7)

Оценки стандартных ошибок для многофакторных регрессионных моделей составляют для ΔF_v $5,5 \text{ Вт/м}^2$ (4% от диапазона изменения АРФ), для ΔF_n – 9 Вт/м^2 (6%). Таким образом, предложенные монофакторные модели являются статистически значимыми и адекватно описывают исходные наборы экспериментальных данных.

Предлагаемые линейные простые многофакторные регрессионные модели АРФ и АРВ, как

всякие статистические модели, имеют следующие особенности. Каждая из этих моделей «наилучшим» образом описывает множество исходных данных только в том диапазоне параметров аэрозоля, внутри которого были найдены коэффициенты модели. Использование этих моделей вне указанного диапазона значений предикторов может привести к получению некорректных результатов. Кроме того, линейные модели не имеют физического содержания. Например, при стремлении количества аэрозоля в атмосфере к нулю ($\tau \rightarrow 0$) эти модели не обеспечивают стремление к нулю значений АРФ и АРВ. Нелинейный характер физической взаимосвязи АРФ и АРВ с определяющими их характеристиками аэрозоля в таких моделях не учитывается, что приводит к необходимости выделять узкие диапазоны изменения параметров (например, типы аэрозоля, диапазоны прозрачности атмосферы, сезоны года и др.), а внутри них разрабатывать свои модели.

Нелинейные модели

Для построения нелинейной модели АРФ и АРВ можно использовать приближенное аналитическое решение задачи переноса излучения, связывающее потоки радиации с параметрами аэрозоля, включите в него неизвестные «подгоночные» коэффициенты, которые затем найти, минимизируя различия расчетных и исходных значений АРФ и АРВ на заданном множестве измеренных характеристик аэрозоля, входящих в эту формулу. Поскольку точного аналитического решения задачи переноса излучения в реальной атмосфере не существует, то вместо него можно использовать аналитическое решение грубой приближенной задачи. Нет необходимости искать точное решение задачи – достаточно установить приблизительный вид функциональной зависимости потоков излучения от параметров аэрозоля, аппроксимирующий реальные физические закономерности. Конкретные значения величин АРФ и АРВ, рассчитываемые по таким формулам, можно получить, подобрав значения «подгоночных» коэффициентов, сопоставляя ряды доступных измерений параметров аэрозоля и значений АРФ, АРВ.

В настоящей статье использовалась аналитическая зависимость АРФ от параметров аэрозоля, найденная в [18, 19]. Следуя общей идее, рассмотрим безоблачный плоскопараллельный слой атмосферы, содержащий поглощающий и рассеивающий излучение аэрозоль. Считаем, что содержание аэрозоля в атмосфере невелико, т.е. рассматривается оптически тонкий слой аэрозоля (малые значения АОТ). В этом случае можно пренебречь многократным взаимодействием излучения с аэрозольными частицами внутри слоя и полагать, что ослабление интенсивности излучения подчиняется закону Бугера. Для простоты будем считать, что солнечное излучение поступает в атмосферу вертикально, т.е. зенитный угол Солнца $\theta_0 = 0$ (учет произвольного зенитного угла не позволяет получить простые аналитические выражения для АРФ и АРВ как функции от параметров аэрозоля).

В такой упрощенной постановке интенсивность прямого солнечного излучения, проходящего через аэрозольный слой и падающего на подстилающую поверхность, пропорциональна $F_0 e^{-\tau}$, где F_0 – интенсивность солнечного излучения, поступающего на верхнюю границу атмосферы. При взаимодействии излучения с аэрозолем часть излучения r рассеивается в верхнюю полусферу и уходит из атмосферы. Если известны альbedo однократного рассеяния ω и коэффициент γ – доля излучения, рассеиваемая по ходу луча в нижнюю полусферу, то $r = (1 - e^{-\tau})\omega(1 - \gamma)$. Очевидно, что коэффициент γ можно вычислить путем соответствующего интегрирования индикатрисы рассеивания, которая, в свою очередь, может быть восстановлена по данным измерений солнечных фотометров (см. сайт AERONET <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). В этих обозначениях нетрудно также записать долю излучения, поглощенного аэрозольным слоем: $(1 - e^{-\tau}) \times (1 - \omega)$, и долю излучения, рассеянного в нижнюю полусферу: $(1 - e^{-\tau})\omega\gamma$. Таким образом, общая интенсивность радиации, прошедшей через слой аэрозольной атмосферы и падающей на подстилающую поверхность, будет пропорциональна величине $t = e^{-\tau} + (1 - e^{-\tau})\omega\gamma$.

Если альbedo поверхности равно A , то после взаимодействия излучения с поверхностью доля его, равная At , снова поступит в слой атмосферы. Часть этого излучения $(At)t$ пройдет атмосферу и покинет ее на верхней границе, часть будет поглощена аэрозолем (и газовыми примесями), а часть $(At)r$ рассеяна в нижнюю полусферу и снова достигнет поверхности. Рассеяние излучения аэрозолем и последующее взаимодействие с подстилающей поверхностью сформируют бесконечный ряд простых слагаемых. Суммарные потоки излучения, покидающего аэрозольную атмосферу на ее верхней границе $F_B^{\uparrow a}$ и падающего на подстилающую поверхность $F_H^{\downarrow a}$, запишутся в виде

$$F_B^{\uparrow a} \sim r + (At)t + [A(At)r]t + \dots = r + \frac{At^2}{1 - Ar}, \quad (8)$$

$$F_H^{\downarrow a} \sim t + (At)r + [A(At)r]r + \dots = \frac{t}{1 - Ar}. \quad (9)$$

Сходимость рядов в левых частях формул (8) и (9) обеспечена тем, что $A < 1$ и $r < 1$. Используя определения (2) и (3), несложно получить приближенные аналитические формулы АРФ и АРВ для конкретной длины волны излучения. Зависимость от длины волны излучения для функций τ , ω , γ может быть восстановлена из измерений только в табличном виде. Поэтому вместо явного интегрирования по спектру коротковолновой солнечной радиации проще использовать теорему о среднем, записав подинтегральные выражения для некоторой одной и той же средней «эффективной» длины волны. В качестве такой длины волны выбрана $\lambda = 0,675$ мкм, для которой имеются данные изме-

рений для всех входящих в формулы параметров. В результате получим приближенные аналитические выражения для АРФ на верхней и АРВ на нижней границах атмосферы:

$$\Delta F_B \sim - \left[\left(r + \frac{t^2 A}{1 - Ar} \right) - A \right] = -r - A \left(\frac{t^2}{1 - Ar} - 1 \right), \quad (10)$$

$$\Delta F_H \sim \left(\frac{t}{1 - Ar} - 1 \right), \quad (11)$$

где

$$r = (1 - e^{-\tau})\omega(1 - \gamma); \quad t = e^{-\tau} + \omega\gamma(1 - e^{-\tau}). \quad (12)$$

В предельном случае чистой атмосферы, т.е. при стремлении к нулю содержания аэрозоля в атмосфере $\tau \rightarrow 0$, формулы (10)–(12) дают физически правильное решение $\Delta F_B \rightarrow 0$ и $\Delta F_H \rightarrow 0$.

Количество эмпирических «подгоночных» коэффициентов и места их подстановки в формулы (10), (11) могут быть различны. Важно, чтобы способ включения коэффициентов в формулы сохранил предельный случай $\tau \rightarrow 0$, а значения коэффициентов обеспечивали бы максимально возможный коэффициент детерминации полученной модели.

С использованием описанных выше исходных данных на основе формул (10)–(12) методом наименьших квадратов были найдены значения неизвестных коэффициентов и получены следующие аппроксимирующие формулы:

$$\Delta F_B = -1434,6r - 1148,3A \left(\frac{t^2}{1 - Ar} - 1 \right), \quad R^2 = 0,93, \quad (13)$$

$$\Delta F_H = 1687,7 \left(\frac{t}{1 - Ar} - 1 \right), \quad R^2 = 0,86. \quad (14)$$

Все коэффициенты в формулах (13), (14) статистически значимы на уровне значимости 0,05. Как видно из (13), (14), коэффициент детерминации на верхней границе атмосферы незначительно понизился по сравнению с линейной многофакторной моделью (6), (7), но на нижней границе [см. формулу (7)] уменьшение оказалось более существенным. Такое снижение качества модели можно объяснить тем, что для нахождения статистической полуэмпирической модели (13), (14) использовались чрезвычайно упрощенные аналитические решения.

На рис. 3 приведены диаграммы сравнения данных АРФ и АРВ по AERONET и соответствующих величин, рассчитанных по нелинейной модели (13), (14).

Хотя коэффициенты регрессии и детерминации уменьшились по сравнению с моделью множественной линейной регрессии, нелинейная модель имеет простой физический смысл, включает предельный случай чистой атмосферы и, как можно ожидать, является более универсальной моделью.

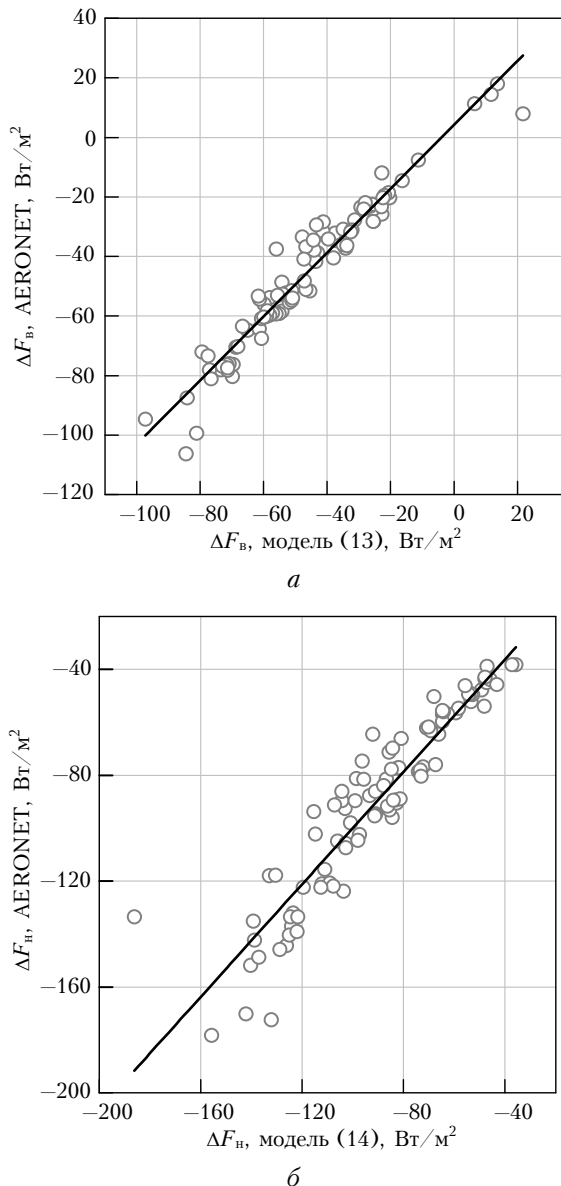


Рис. 3. Диаграммы рассеяния, рассчитанные по данным AERONET и нелинейным моделям: *a* — для АРФ на верхней границе атмосферы, уравнение (13); *б* — для АРВ на нижней границе атмосферы, уравнение (14)

Заклучение

С использованием результатов долговременных измерений за 2004–2014 гг. в пункте мониторинга системы AERONET, расположенном на Среднем Урале, выполнен статистический анализ связей прямого аэрозольного радиационного форсинга и аэрозольного радиационного возмущения в коротковолновой области спектра с оптическими и микрофизическими характеристиками атмосферного аэрозоля.

1. Предложено использовать многофакторный регрессионный анализ для построения простых моделей «АРФ, АРВ — параметры аэрозоля», поскольку характеристика атмосферного аэрозоля с помощью единственного параметра (обычно это АОТ) не является полной.

2. Найдены ранжированные наборы параметров аэрозоля, являющиеся статистически независимыми наиболее значимыми предикторами для построения регрессионных моделей. Для АРФ на верхней границе атмосферы такими параметрами являются АОТ, альbedo однократного рассеяния, альbedo поверхности. Для АРВ на нижней границе атмосферы — АОТ, альbedo однократного рассеяния, зенитный угол Солнца. Используются значения предикторов на длине волны 0,675 мкм.

3. Представлены полуэмпирические статистические линейные многофакторные модели влияния атмосферного аэрозоля АРФ и АРВ. Показано, что многофакторные модели имеют более высокое качество, т.е. более высокие коэффициенты детерминации по сравнению с моделями, связывающими АРФ и АРВ только с аэрозольной оптической толщиной.

4. Предложены простые нелинейные модели АРФ и АРВ, основанные на приближенной аналитической функциональной зависимости потоков радиации в аэрозольной атмосфере от АОТ, альbedo однократного рассеяния, альbedo поверхности и доли рассеянного в прямом направлении излучения, обеспечивающие физически корректный предельный переход при $\text{АОТ} \rightarrow 0$, т.е. в случае чистой атмосферы.

Авторы выражают благодарность С.А. Бересневу, С.Ю. Горде (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия), Т.Б. Журавлевой, С.М. Сакерину, М.В. Панченко, Д.М. Кабанову (Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия), В.Н. Holben, А.В. Smirnov (Центр космических полетов Годдарда (GSFC/NASA), Greenbelt, USA).

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта фундаментальных исследований ИПЭ УрО РАН № 15-ИПЭ-03 и проекта фундаментальных и поисковых научных исследований, выполняемого в рамках соглашения о сотрудничестве УрФУ и УрО РАН, «Моделирование процессов переноса атмосферного аэрозоля».

1. Myhre G., Shindell D., Bréon F.-M., Collins W., Fuglestedt J., Huang J., Koch D., Lamarque J.-F., Lee D., Mendoza B., Nakajima T., Robock A., Stephens G., Takemura T., Zhang H. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2013. P. 659–740.
2. URL: <http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/jin/rtnote.html> (дата обращения: 28.10.2014).
3. URL: <http://www.cpi.com/projects/mosart.html> (дата обращения: 28.10.2014).
4. Журавлева Т.Б. Моделирование переноса солнечного излучения в различных атмосферных условиях. Часть I: Детерминированная атмосфера // *Оптика атмосф. и океана*. 2008. Т. 21, № 2. С. 99–114.
5. Журавлева Т.Б., Сакерин С.М. Моделирование прямого радиационного форсинга аэрозоля для типичных летних условий Сибири. Часть 2: Диапазон изменчивости и чувствительность к входным параметрам // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. Т. 22, № 2. С. 173–182.

6. *Ramaswamy V., Boucher O., Haigh J., Hauglustaine D., Haywood J., Myhre G., Nakajima T., Shi G.Y., Solomon S.* Radiative Forcing of Climate Change // *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2001. P. 349–416.
7. *Procopio A.S., Artaxo P., Kaufman Y.J., Remer L.A., Shafer J.S., Holben B.N.* Multiyear analysis of Amazonian biomass burning smoke radiative forcing of climate // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31, N 3. P. L3108–L3112.
8. *Ситнов С.А., Горчаков Г.И., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Карпов А.В.* Влияние атмосферной циркуляции на эволюцию и радиационный форсинг дымового аэрозоля на европейской части России летом 2010 г. // *Исслед. Земли из космоса.* 2013. № 2. С. 28–41.
9. *Горчакова И.А., Мохов И.И.* Радиационный и температурный эффекты дымового аэрозоля в Московском регионе в период летних пожаров 2010 г. // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2012. Т. 48, № 5. С. 558–565.
10. *Chubarova N., Nezval' Ye., Sviridenkov M., Smirnov A., Slutsker I.* Smoke aerosol and its radiative effects during extreme fire event over Central Russia in summer 2010 // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 3. P. 557–568.
11. *Dubovik O., King M.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophys. Res. D.* 2000. V. 105, N 16. P. 20673–20696.
12. *Dubovik O., Holben B., Eck T., Smirnov A., Kaufman Y., King M., Tanré D., Slutsker I.* Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations // *J. Atmos. Sci.* 2002. V. 59, N 3. P. 590–608.
13. *Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под ред. С.М. Сакерина.* Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. 482 с.
14. *Garcia O.E., Diaz J.P., Exposito F.J., Diaz A.M., Dubovic O., Dermian Y., Dubuisson P., Roger J.-C.* Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 5129–5145.
15. *Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Сакерин С.М.* Особенности оптических характеристик атмосферного аэрозоля на Среднем Урале // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2013. Т. 49, № 3. С. 314–322.
16. *Moody E.G., King M.D., Platnik S., Schaaf C.B., Gao F.* Spatially complete global spectral surface albedos: Value-added datasets derived from Terra MODIS land products // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2005. V. 43, N 1. P. 144–158.
17. *Derimian Y., Leon J.-F., Dubovik O., Chiapello I., Tanré D., Sinyuk A., Auriol F., Podvin T., Brogniez G., Holben B.N.* Radiative properties of aerosol mixture observed during the dry season 2006 over M'Bour, Senegal (African Monsoon Multidisciplinary Analysis campaign) // *J. Geophys. Res. D.* 2008. V. 113, N 23. D00C09. DOI: 10.1029/2008JD009904.
18. *Haywood J.M., Shine K.P.* The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22, N 5. P. 603–606.
19. *Seinfeld J.H., Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: Wiley and Sons, Inc., 2006. 1248 p.

A.P. Luzhetskaya, V.A. Poddubnyi, T.V. Tsipushtanova. **Semi empirical statistical models of the influence of atmospheric aerosol on perturbation of fluxes of short-wave solar radiation from data of photometric measurements.**

Statistical analysis of the links between direct aerosol radiative forcing at the upper boundary of the atmosphere (ARF), aerosol radiative perturbation at the lower boundary of the atmosphere (ARP) in spectral range from 0.2 to 4.0 μm and optical and microphysical characteristics of atmospheric aerosol was carried out using measurements by global network AERONET in the Middle Urals during 2004–2014. It is proposed to use multiple regression analysis to build simple models of ARF, ARP – parameters of the aerosol. The ranked sets of the most significant statistically independent predictors of aerosol parameters were found. The semi empirical linear and nonlinear statistical models of the influence of the atmospheric aerosol on perturbation fluxes of short-wave solar radiation on the upper and lower boundary of the atmosphere were proposed.